Journal of Water and Soil
Homepage: https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 733-749

Investigating the Soil Evolution and Microbial Respiration along a Semi-Arid Alluvial Fan in Northeastern Iran

M. Hassanzadeh Bashtian[1], A. Karimi[2]*, A. Sepehr[3], A. Lakzian[4], O. Bayat[5]
1, 2, and 4- Ph.D. Student and Professors, Department of Soil Science College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Auther Email: karimi-a@um.ac.ir)
3- Associate Professer, Department of Desert and Arid Zones Management College of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
5- Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland

Received: 30-07-2023 Revised: 13-09-2023 Accepted: 26-09-2023 Available Online: 26-09-2023	**How to cite this article:** Hassanzadeh Bashtian, M., Karimi, A., Sepehr, A., Lakzian, A., & Bayat, O. (2023). Investigating the soil evolution and microbial respiration along a semi-arid alluvial fan in northeastern Iran. *Journal of Water and Soil, 37*(5), 733-749. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83632.1313

Introduction

Soils and landforms have a strong relationship and archive evidence of climatic and environmental changes. Alluvial fans are one of the most important landforms in arid and semi-arid regions of Iran. Climate changes in the Quaternary, especially in the late Pleistocene, had a significant effect on the evolutions of alluvial fans in arid and semi-arid regions. Alternate of sedimentation and soil formation in alluvial are the consequences of periodic climate change. Organisms are one of the main factors of soil formation. Biological crusts are part of organisms that are abundant in dry lands and especially in alluvial fans; however, their role in soil formation has been less studied. Biological soil crusts by providing the suitable biological activity, effect on trapping of aeoilian materials and hydrological processes affect the soil formation processes. The chemical properties of the soil affect the catabolic capacity of the soil and it is very different among the different layers of the soil. However, few studies have addressed the effect of processes on soil microbial respiration during change and evolution and pedogenic state. The objectives of this research were to 1) investigate the evolution of soils along the gradient from upstream to downstream of the alluvial fan and 2) investigate the changes in microbial respiration in different layers of soil and the factors affecting it.

Materials and Methods

The studied area is an alluvial fan in Razavi Khorasan province, in the southern slopes of the Binaloud mountain range. The climate of the region is semi-arid and the soil moisture and temperature regimes are Aridic border on Xeric and mesic, respectively. Three soil profile in the upper, middle, and base part of the alluvial fan were described. Bulk and undisturbed soil samples were collected from various soil horizons for subsequent physical, chemical, and micromorphological analyses. In addition, the microbial soil respiration was measured in all horizons. The soils were classified according to Soil Taxonomy and World Reference Base methods.

Results and Discussion

Sequences of sedimentation and soil formation were observed in the soil profiles. Vesicular (V), argillic (Bt), argillic-calcic (Btk), calcic (BCk) and cambic (Bw) horizons were the diagnostic soil horizons of the studied soils. Soil profiles of the middle and base were Xeric Calciargids in the subgroup category of Soil Taxonomy; while soil profile of the apex soil was Xeric Haplocambids. In the profiles, a thin vesicular horizon (V) was formed under

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83632.1313

the desert pavement. Below the vesicular horizon, evidence of clay illuviation, pedogenic carbonate nodules, and calcium oxalates in roots were observed in thin sections. This evidence shows the role of biological crusts in the formation of these features. In the lower horizons of the profiles, pedogenic carbonate nodules, carbonates pendants and clay coatings were observed. It seems that the upper soil (vesicular and underlying Bt horizons**)** were developed in the more humid periods of the Holocene, and biological crusts also played a key role in the processes of calcification and clay illuviation. The argillic horizons in the lower layers were formed during the stable periods of the late Pleistocene. The irregular microbial respiration mainly indicated difference in microbial activities labile organic matter content. The argillic horizons had the lowest microbial respiration, due to decomposition of organic materials during soil formation. In contrast, soil respiration was the highest in surface and calcic horizons. It seems that preservation of organic materials by carbonate complication. However, it is suggested to investigate the carbon fractions in relation to microbial biomass in the studied horizons.

Conclusion

In this area, biological crusts and vegetation affected the formation of soil in the aeolian sediments of the Vk and AVk horizons and played a significant role in creating the Bt horizon in profiles 2 and 3. The study of landform profiles showed the formation of calcic and argillic horizons in the past climate, while the Bt horizon of the upper layers was formed in the current Holocene period. This form of the argillic horizon is slightly different from the soils of the Iranian region because these horizons have not been reported so far. It has been proven that there were humid periods in the Holocene, and it needs more studies at present. The study of soil microbial respiration in landform horizons showed that argillic horizons decreased the amount of microbial respiration, while it increased in classical horizons.

Keywords: Argillic horizon, Biocrust, Calcium oxalate, Soil micromorphology, Vesicular horizon

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۴۹-۷۳۳

بررسی فرآیندهای تغییر و تحول و تنفس میکروبی خاک در امتداد یک مخروطافکنه نیمه‌خشک در شمال شرق ایران

مهوان حسن‌زاده بشتیان[۱]- علیرضا کریمی[۲*]- عادل سپهر[۳]- امیر لکزیان[۴]- امید بیات[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

چکیده

خاک‌ها با اشکال اراضی که بر روی آن‌ها تکامل می‌یابند، ارتباط تنگاتنگ دارند و ویژگی‌های آن‌ها به نوبه خود بر تکامل ژئوفرم‌ها تأثیر می‌گذارد. این پژوهش به بررسی تغییر و تحول خاک در امتداد گرادیان ارتفاعی یک مخروطافکنه نیمه‌خشک در جنوب رشته‌کوه بینالود در شمال شرق ایران پرداخته است. همچنین، تأثیر فرآیندهای خاک بر تنفس میکروبی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در بخش بالایی، میانی و قاعده مخروطافکنه، هر کدام، یک خاکرخ شاهد تشریح و از افق‌های آنها نمونه‌برداری شد. آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی، میکرومورفولوژی و تنفس میکروبی بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین، طبقه‌بندی خاکرخ‌های مطالعاتی براساس دو سامانه آمریکایی و جهانی صورت گرفت. در هر سه خاکرخ، توالی‌های رسوبگذاری و خاک‌سازی مشاهده شد. افق‌های وزیکولار (V)، آرجیلیک (Bt)، آرجیلیک-کلسیک (Btk)، کلسیک (BCk) و کمبیک (Bw) شناسایی شدند. هر دو سامانه بخش بالایی را در طبقه‌بندی متمایزی از دو بخش دیگر قرار دادند. خاک‌های میانه و قاعده مخروطافکنه براساس سامانه رده‌بندی آمریکایی در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفتند، در حالی‌که خاکرخ بالایی را در Xeric Haplocambids قرار داد. در هر سه خاکرخ افق وزیکولار نازک در زیر سنگفرش بیابانی، تشکیل شده بود. در زیر افق وزیکولار، شواهد پوسته‌های رسی، نودول‌های کربنات پدوژنیک و اگزالات‌های کلسیم در ریشه‌ها در مقاطع نازک مشاهده شد. این شواهد نشان‌دهنده نقش پوسته‌های زیستی در تشکیل این ویژگی‌ها است. در افق‌های زیرین خاکرخ‌ها، نودول‌های کربنات پدوژنیک، پندانت‌های آهکی و پوسته‌های رسی مشاهده شد. وجود توالی‌های رسوبگذاری و افق‌های کلسیک و آرجیلیک، نشان‌دهنده تشکیل آن ها در تناوب تغییرات اقلیمی است. به‌نظر می‌رسد که خاک رویین در هر سه خاکرخ، در دوره‌های مرطوب‌تر هولوسن تشکیل شده است و پوسته‌های زیستی هم در فرآیندهای آهکی شدن و انتقال و تجمع رس نقش داشته‌اند. افق‌های آرجیلیک در لایه‌های زیرین، در دوره‌های پایدار پلئیستوسن انتهایی تشکیل شده‌اند. مطالعه تنفس میکروبی خاک در افق‌های مختلف نشان داد که در افق‌های آرجیلیک میزان تنفس میکروبی کاهش یافته است؛ در حالی که در افق های کلسیک افزایش داشته است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی مقادیر اجزای کربن در ارتباط با زیست‌توده میکروبی در افق‌ها و خاک‌های قدیمی بررسی گردد.

واژه‌های کلیدی: افق آرجیلیک، افق وزیکولار، اگزالات کلسیم، پوسته زیستی، میکرومورفولوژی خاک

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۵- گروه جغرافیا، دانشگاه زوریخ، زوریخ، سوئیس
(*- نویسنده مسئول: Email: karimi-a@um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83632.1313

مقدمه

خاک‌ها زمانی که در شرایط محیطی پایدار قرار گیرند با تغییر خصوصیات بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی تحت تأثیر عوامل خاک‌سازی به سمت تکامل پیش می‌روند. افق‌های خاک‌ها از تعامل عوامل و فرآیندهای خاک‌سازی در محیط پویای شکل‌های اراضی ایجاد می‌شوند. موقعیت تشکیل خاک در شکل اراضی و اقلیم از جمله عوامل خاک‌سازی هستند که سرعت تشکیل و تحول خاک را مشخص می‌کنند (Buol *et al.*, 2011). خاک‌ها ارتباط نزدیک و متقابلی با شکل‌های اراضی که بر روی آن‌ها تشکیل شده‌اند، دارند و شاهدی بر تغییرات اقلیمی و محیطی هستند که در طی زمان تغییر می‌کنند. بنابراین، اطلاعات حاصل از خاک‌ها برای بازسازی تغییر و تحول شکل های اراضی به‌کار برده می‌شود (Schaetzl and Thompson, 2015).

تغییرات اقلیمی در کواترنر، به‌ویژه در پلیستوسن انتهایی، تأثیر قابل توجهی بر تغییر و تحولات مخروط‌افکنه‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک داشته است. در دوره‌های مرطوب پلئیستوسن، جریان‌های آبرفتی، مواد رسوبی بیشتری را به مناطق پایین‌دست انتقال داده و موجب شکل‌گیری گسترده مخروط‌افکنه‌ها شده است (Ponti, 1985; Stock *et al.*, 2008). اگر چه ترتیب و توالی رسوبگذاری مخروط‌افکنه ها در پاسخ به تغییرات اقلیم و در نتیجه پوشش گیاهی رخ داده است؛ با این حال، نقش عوامل دیگر به‌ویژه تکتونیک، سازند زمین‌شناسی، شرایط توپوگرافی و هیدرولوژی نیز از عوامل تعیین‌کننده در تشکیل و گسترش مخروط‌افکنه‌ها هستند. تناوب رسوبگذاری و خاک‌سازی در شکل‌های اراضی دامنه‌ای، به‌ویژه در مخروط‌افکنه‌ها، به‌عنوان شواهدی از تغییر و تحول مخروط‌افکنه استفاده شده است (Stock *et al.*, 2008; Bayat *et al.*, 2013; Ghasemzadeh Ganjehie *et al.*, 2017).

در دوره‌های عدم ثبات، رسوبگذاری در مخروط‌افکنه فعال است و بسته به شدت این فرآیند، ممکن است رسوبات مختلفی از نظر اندازه ذرات و جورشدگی منتقل شوند که لایه‌بندی متفاوت این رسوبات گواه این مطلب است (Stock *et al.*, 2008). در دوره‌های ثبات، شرایط برای تشکیل خاک مناسب است که بر اساس شرایط محیطی، خاک‌های باتکامل متفاوت تشکیل می‌شوند. به‌عنوان مثال، افق‌های آرجیلیک، یکی از متکامل‌ترین افق‌های تشکیل شده در مناطق خشک هستند که معمولاً در دوره‌های مناسب پلیئستوسن تشکیل شده‌اند. در حالی که خاک‌های تشکیل شده در هولوسن معمولاً تکامل کمی دارند و دارای افق‌های کلسیک و کمبیک هستند (Khormali *et al.*, 2003; Karimi *et al.*, 2011; Rashidi *et al.*, 2022). شواهد مورفولوژیکی افق‌ها در صحرا، ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی و کانی‌شناسی، از مهم‌ترین شواهد مطالعه و تشخیص این خاک‌ها و شرایط تشکیل آنها است (Bullock *et al.*, 1985; Stoops, 2018).

موجودات زنده یکی از عوامل اصلی تشکیل خاک هستند (Jenny, 1981). از ابتدایی‌ترین موجودات زنده که باعث هوادیدگی کانی‌ها و تجمع رسوبات و عناصر با ایجاد پستی و بلندی می‌شوند (Williams *et al.*, 2012)، پوسته‌های زیستی خاک[1] هستند که شامل سیانوباکترها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، گلسنگ‌های خاکزی و خزه‌ها می‌باشند (Weber *et al.*, 2022). پوسته‌های زیستی، نقش حیاتی در فرآیندهای خاک از جمله هوادیدگی سطحی و فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند نفوذ و تبخیر، ایفا می‌کنند (Sun *et al.*, 2023). آن‌ها باعث افزایش کربن آلی، تنفس میکروبی، خاکدانه‌سازی و ایجاد مقاومت در برابر فرسایش خاک می‌شوند (Xiao *et al.*, 2022). تنفس میکروبی خاک طی مصرف مواد آلی توسط ریزجانداران، باعث تولید دی‌اکسید کربن اتمسفر می‌شود. این موضوع، نشان‌دهنده فعالیت متابولیکی کلی جمعیت‌های میکروبی خاک است و معمولاً به‌عنوان شاخص سلامت خاک استفاده می‌شود. خواص شیمیایی خاک بر ظرفیت کاتابولیک خاک تأثیر می گذارد و در بین لایه‌های مختلف خاک بسیار متفاوت هستند (Weldmichael *et al.*, 2020). دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط فعالیت بیولوژیکی موجودات خاک، یک جریان اصلی در چرخه جهانی کربن محسوب می‌شود (Le Quéré *et al.*, 2015). غلظت بالای دی اکسیدکربن در اعماق بیش از یک متر توسط پژوهشگران مختلف (از جمله: Wood *et al.*, 1993; Trumbore *et al.*, 2006) مشاهده شده است. با این وجود، تعداد کمی از مطالعات به اثر فرآیندها بر تنفس میکروبی خاک در طول تغییر و تحولات خاکسازی پرداخته است.

مخروط‌افکنه‌ها، از مهم‌ترین شکل‌های اراضی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران هستند. تناوب رسوبگذاری و خاک‌سازی، از ویژگی‌های شناخته شده در مخروط‌افکنه‌ها می‌باشند که برای مطالعات تغییر و تحولات خاک و شکل اراضی مناسب هستند (Stock *et al.*, 2008; Ghasemzadeh Ganjehie *et al.*, 2017). پوسته‌های زیستی، بخشی از موجودات زنده هستند که در مناطق خشک و در مخروط‌افکنه‌ها به فراوانی وجود دارند؛ ولی کمتر به نقش آنها در تشکیل خاک پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، (۱) بررسی تغییر و تحول خاک‌ها در امتداد گرادیان یک مخروط‌افکنه از بالادست به سمت پایین‌دست آن براساس ویژگی‌های مورفولوژیکی و میکرومورفولوژی خاک و (۲) بررسی تغییرات تنفس میکروبی در افق‌ها و یا لایه‌های مختلف خاک و تعیین عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌باشد.

1- Biological Soil Crusts

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه یک مخروطافکنه در استان خراسان رضوی و در دامنه‌های جنوبی بینالود می‌باشد که در محدوده جغرافیایی "۵۸°۵۹'۳۴ تا "۵۹°۰'۱۸ طول شرقی و "۳۶°۱۰'۱۲ تا "۳۶°۱۰'۳۹ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مخروط افکنه مورد مطالعه در سطح اراضی هموار قرار دارد، زیرا شیب آن بین ۸-۳ درصد و شدت پستی و بلندی (میانگین ۴۶/۵ متر بر کیلومتر (ارتفاع به فاصله)) کمتر از ۵۰ متر بر کیلومتر است. فرم شیب به‌صورت شعاعی و محدب می باشد. رسوبات آن از سازندهای بالادست تشکیل شده‌اند که از سنگ های رسوبی کربناتی سنگ آهک و دولومیت، سنگ‌های رسوبی آواری ماسه سنگ و کنگلومرا، شیل و کوارتزیت دگرگون شده و سنگ‌های آذرین بازالت، آندزیت و توف منشأ گرفته‌اند (Geological map of Neyshabur, 1:100000 scale). این منطقه دارای پوشش گیاهی یکساله، چندساله و بوته‌ای، و همچنین، دارای پوسته‌های زیستی خزه، گلسنگ، سیانوباکتر و جلبک سبز است (Bashtian *et al*., 2019).

منطقه مورد مطالعه در حوزه آبریز نیشابور قرار گرفته و میانگین دمای سالیانه آن، ۱۳/۵ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالیانه آن، ۲۴۷/۴ میلی‌متر می‌باشد (بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور) و منطقه از اقلیمی نیمه‌خشک (بر اساس اقلیم نمای دومارتن) بهره می برد (Dowlatabadi *et al*., 2022). براساس اطلاعات اقلیمی رژیم رطوبتی خاک منطقه، اریدیک در مرز زریک[1] و رژیم حرارتی خاک آن، مزیک[2] محاسبه شد (Soil Survey Staff, 2022).

مطالعات صحرایی

حفر خاکرخ‌ها برای بررسی تغییر و تحول خاک در امتداد گرادیان ارتفاعی، در سه بخش بالایی (خاکرخ شماره ۱)، میانه (خاکرخ شماره ۲) و قاعده (خاکرخ شماره ۳) مخروطافکنه در فواصل ۳۰۰ متری از یکدیگر انجام شد. پس از تشریح صحرایی خاکرخ‌ها، از افق‌های ژنتیکی آن‌ها برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی لازم نمونه‌برداری شد. همچنین نمونه خاک دست‌نخورده به‌منظور انجام مطالعات میکرومورفولوژی از برخی افق‌ها برداشت گردید، بدین صورت که اطراف نمونه را خالی و سپس در جعبه مخصوص قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شد. به‌علاوه، نمونه‌های مرطوب خاک برای اندازه گیری تنفس میکروبی هر کدام از افق‌ها برداشت شد.

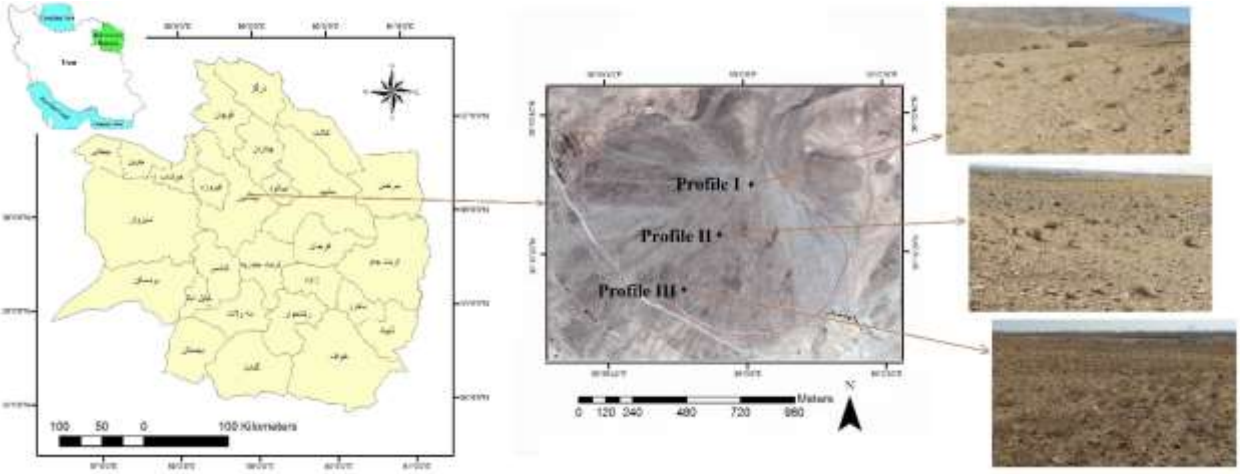
آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک، پس از انتقال به آزمایشگاه، به منظور انجام تجزیه های فیزیکی و شیمیایی، هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، بافت خاک آن‌ها به روش هیدرومتر (ASTM 152H) (Gee and Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در سوسپانسیون ۱:۱ خاک – آب توسط هدایت‌سنج الکتریکی و پی‌اچ‌متر (Jenway Inc, England)، میزان کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Allison and Moodie, 1965)، گچ به روش آون‌خشک (Omran, 2016) و کربن آلی خاک به روش اکسایش دی‌کرومات (Nelson and Sommers, 1996) اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری تنفس میکروبی به روش تیتراسیون برگشتی انجام گرفت (Anderson, 1982). برای این منظور، ۳۰ گرم خاک تازه را در یک پلیت کوچک در یک ظرف ۱۰۰۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۰۵ مولار قرار داده و درپوش آن را بسته و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت سه روز نگهداری گردید، سپس به هیدروکسید سدیم ۱۰ میلی‌لیتر کلرید باریم اضافه شد و در نهایت محلول با هیدروکلریک اسید ۰/۰۵ مولار در حضور فنل‌فتالئین به روش تیتراسیون برگشتی اندازه‌گیری شد. همچنین از نمونه‌های مرطوب برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی (آون‌خشک) استفاده گردید.

نمونه‌های دست‌نخورده پس از اینکه هوا خشک شدند، با استفاده از ترکیب ۶۰ درصد رزین پلی‌استر، ۴۰ درصد استون، ۱۴ قطره اسید استئاریک و ۷ قطره کبالت، به آرامی اشباع شدند. نمونه‌ها پس از حدود دو ماه، خشک و سپس توسط دستگاه برش، به قطعات کوچکتر تبدیل شدند و در ادامه بر روی لام چسبانده و نازک گردیدند. سپس با پودر کراندوم به ضخامت ۳۰ میکرون‌متر رسانده شدند. به‌منظور مطالعه میکرومورفولوژی، مقاطع نازک حاصل توسط میکروسکوپ پلاریزان در نور عادی (PPL[3]) و پلاریزه متقاطع (XPL[4]) براساس روش استوپس (2003) بررسی و عکس‌برداری شدند.

با توجه به مطالعات صحرایی و نتایج آزمایشگاهی حاصل، خاکرخ های مورد نظر بر اساس سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی[5] (Soil Survey Staff, 2022) و جهانی[6] (IUSS Working Group WRB, 2022) طبقه‌بندی شدند.

1- Aridic border on Xeric
2- Mesic
3- Plain Polarized Light
4- Cross Polarized Light
5- Soil Taxonomy
6- WRB (World Reference Base)



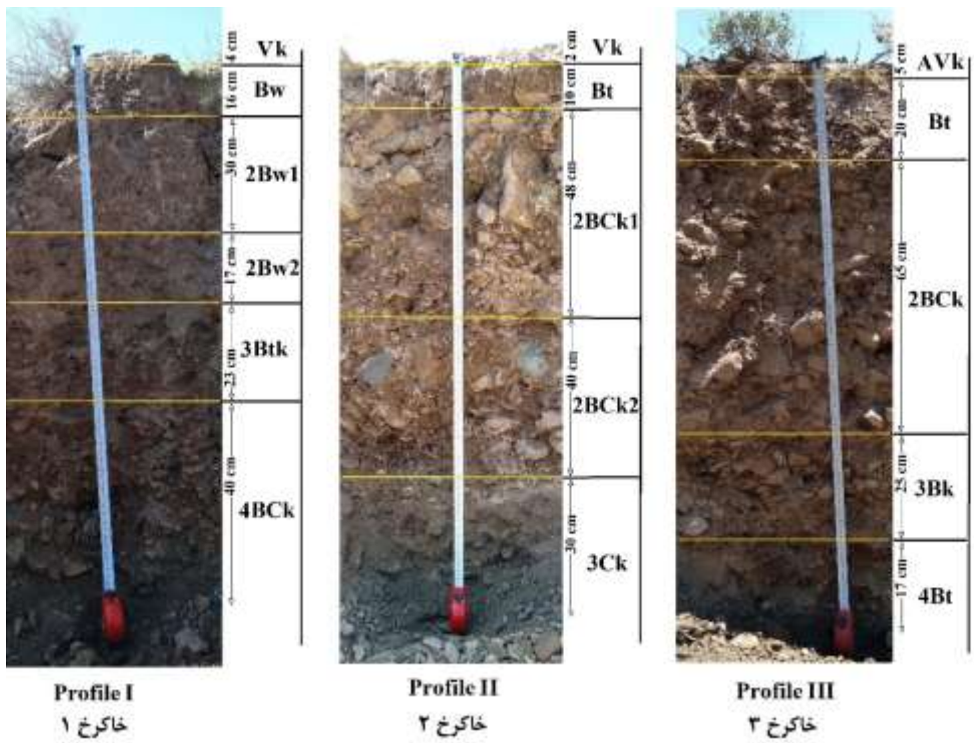
شکل ۱- موقعیت منطقه و خاکرخ‌های مورد مطالعه در آن به‌همراه نمای سطحی مخروط‌افکنه

Figure 1- The location of the studied area and the studied profiles along the surface of the alluvial fan

نتایج

ویژگی های مورفولوژیکی، فیزیکی و شـــیمـیایی افق های خاکرخ‌ها

مورفولوژی و ترتیب و توالی افق‌های شناسایی شده در خاکرخ‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. وجود لایه‌های متناوب رسوبات آبرفتی با مقادیر متفاوت قطعات سنگی نشان‌دهنده دوره‌های رسوبگذاری است که از ویژگی‌های رسوبات مخروط‌افکنه است و باعث ایجاد انقطاع سنگی در خاکرخ‌ها شده است. ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاکرخ‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۲- مقاطع خاکرخ های مورد مطالعه و افق‌های شناسایی شده در آنها

Figure 2- The sequences of layers and horizons in the studied profiles

جدول ۱- برخی ویژگی‌های صحرایی و مورفولوژیکی افق‌های خاکرخ‌های مورد مطالعه

Table 1- Some field and morphological characteristics of the studied profile

افق Horizon	عمق (cm) Depth	رنگ خشک Dry color	رنگ مرطوب Wet color	قطعات سنگی (٪) Coarse fragments	بافت Texture	ساختمان Structure*	تجمعات و مورفولوژی خاک Aggregations and soil morphology
				Profile I خاکرخ شماره ۱			
Vk	0-4	10YR6/4	10YR5/4	15	cl	1 vn pl	Low biological crusts, biogenic carbonate
Bw	4-20	10YR6/4	10YR4/4	15	cl	2 vf sbk	Iron oxide matrix, low clay coating
2Bw1	20-50	10YR6/4	10YR4/4	18	cl	2 vf abk	Low Carbonate nodule, low clay coating, free iron oxide
2Bw2	50-67	10YR6/4	10YR4/4	18	l	2 vf sbk	Iron oxide nodule, low clay coating
3Btkb	67-90	7.5YR6/4	7.5YR4/4	52	scl	3 f sbk	Clay coating, iron oxide, carbonate nodule
4BCkb	90-130	10YR6/4	10YR5/4	55	scl	1 vf sbk	Carbonates pendants
				Profile II خاکرخ شماره ۲			
Vk	0-2	10YR6/3	10YR4/3	20	l	3 vn, tn pl	Biological crusts, biogenic carbonate
Bt	2-12	7.5YR5/4	7.5YR4/4	10	cl	3 f abk	Iron oxide matrix, clay coating, red color
2BCk1	12-60	10YR6/4	10YR5/4	80	cl	1 f abk	Carbonates pendants
2BCk2	60-100	10YR6/3	10YR4/3	80	cl	1 vf, f abk	Carbonates pendants
3Ck	100-130	10YR7/3	10YR5/4	80	cl	0 sgr	Carbonates pendants
				Profile III خاکرخ شماره ۳			
AVk	0-5	10YR5/4	10YR4/4	10	l	3 vn, tn pl	Biological crusts, biogenic carbonate, dark soil color
Bt	5-25	7.5YR5/4	7.5YR4/4	20	l	2 vf, f abk	Iron oxide matrix, clay coating
2BCk	25-90	10YR6/3	10YR4/3	78	scl	1 f sbk	Carbonates pendants
3Bk	90-115	10YR6/4	10YR4/4	75	scl	1 vf sbk	Carbonates pendants, sandy texture
4Bt	115-130	7.5YR5/4	7.5YR4/4	10	l	3 vf, f abk	Iron oxide matrix, deformed clay coating, red color

* Abbreviations used to describe soil texture and structure are based on the guidelines of the soil description and sampling book (Schoeneberger *et al*., 2012).

cl: Clay loam, l: Loam, scl: Sandy clay loam, 0: Structureless, 1: Weak, 2: Moderate, 3: Strong, f: Fine, t: Thin, vf: Very fine, vn: Very thin, abk: Angular blocky, sbk: Subangular blocky, pl: Platy, sgr: Single grain.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های خاکرخ‌های مورد مطالعه

Table 2- Some physical and chemical characteristics of the studied profile

افق Horizon	عمق (cm) Depth	رس (٪) Clay	سیلت (٪) Silt	شن (٪) Sand	pH	EC (dS/m)	کلسیم کربنات معادل (٪) calcium carbonate equivalent	کربن آلی (٪) Organic carbon	تنفس میکروبی microbial respiration (mg/kg*day)	گچ (٪) Gypsum
						Profile I خاکرخ شماره ۱				
Vk	0-4	31.5	34.1	34.4	8.25	0.34	23.75	0.25	51.33	1.26
Bw	4-20	28.3	36.5	35.2	8.48	0.26	18.25	0.29	15.89	1.39
2Bw1	20-50	27.7	28.9	43.4	8.27	0.43	22.75	0.12	63.56	1.68
2Bw2	50-67	25.7	28.9	45.4	8.42	0.22	22.00	0.10	40.33	1.30
3Btkb	67-90	28.3	26.3	45.4	8.49	0.21	24.88	0.10	23.22	1.16
4BCkb	90-130	23.3	21.3	55.4	8.38	0.20	30.63	0.12	72.11	1.17
						Profile II خاکرخ شماره ۲				
Vk	0-2	21.7	37.9	40.4	8.16	0.41	20.38	0.62	105.11	1.42
Bt	2-12	36.3	29.3	34.4	8.78	0.37	19.00	0.14	50.11	2.02
2BCk1	12-60	36.7	29.9	33.4	8.90	0.34	25.38	0.14	56.22	1.71
2BCk2	60-100	31.3	27.3	41.4	9.14	0.39	29.75	0.04	20.78	1.31
3Ck	100-130	35.3	29.3	35.4	9.01	0.39	29.00	0.04	31.78	1.64
						Profile III خاکرخ شماره ۳				
AVk	0-5	22.9	42.7	34.4	8.09	0.45	16.63	0.82	45.22	1.30
Bt	5-25	27.5	37.3	35.2	7.64	0.26	16.20	0.43	44.00	1.43
2BCk	25-90	25.3	27.3	47.4	8.40	0.21	22.75	0.14	14.67	1.03
3Bk	90-115	20.7	18.3	61.0	8.74	0.27	28.63	0.10	77.00	1.31
4Bt	115-130	19.7	39.3	41.0	8.65	0.29	24.13	0.00	18.33	1.53

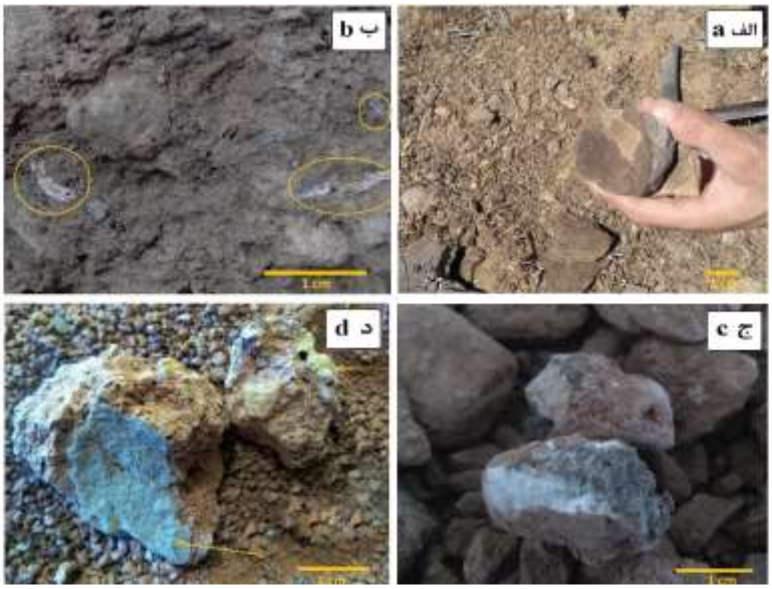
سطح خاک مخروطافکنه بیش از ۲۰ درصد اجزاء درشت‌تر از دو میلیمتر دارد و دارای سطوح جلای بیابانی[1] می‌باشند (شکل ۳ الف). نکته جالب توجه در هر سه خاکرخ، وجود افق وزیکولار (V) است که دارای ساختمان ورقه‌ای و وزیکولار است. در این افق کربنات‌های پدوژنیک هم مشاهده شد که بخشی از آن، کربنات بیوژنیک است که در ریشه‌ها تشکیل شده است (شکل ۳ ب). در خاکرخ‌های مورد مطالعه افق سطحی اکریک و افق‌های زیرسطحی کمبیک (Bw)، کلسیک (Bk)، آرجیلیک (Bt) و کلسیک-آرجیلیک (Btk) وجود داشت.

خاکرخ شماره ۱، در بالادست مخروطافکنه قرار دارد. این خاکرخ دارای پنج افق متفاوت و چهار تغییر در نوع ماده مادری (انقطاع سنگی) است. در زیر افق وزیکولار نازک (Vk)، افق کمبیک (Bw) در عمق ۲۰-۴ سانتی‌متری قرار دارد که شواهدی کمی از پوسته رسی دارد و رنگ آن نسبت به افق رویی تیره‌تر و نسبت به افق‌های آرجیلیک روشن‌تر است (جدول ۱). در زیر افق Bw لایه با تکامل کم افق‌های کمبیک (2Bw1, 2Bw2) از نظر مقدار و شکل قطعات سنگی متفاوت از افق فوقانی و دارای کمی نودول‌های کربنات ثانویه بود. در زیر این افق‌ها، افق 3Btkb با ۵۲ درصد قطعات سنگی وجود داشت که نشان‌دهنده رسوبگذاری متفاوت بود و به‌عنوان انقطاع سنگی شناسایی شد. رنگ قهوه‌ای روشن متمایل به قرمز این افق نشان‌دهنده نودول و تجمعات کربنات‌ها (شکل ۳ د) به‌عنوان افق کلسیک و وجود پوسته رسی به‌عنوان افق آرجیلیک است. این افق دارای بافت متمایز نسبت به افق‌های رویین خود است (رس لومی شنی). افق 4BCkb در اعماق پایین‌تر این خاکرخ قرار دارد. این افق به‌دلیل وجود پندانت‌های آهکی در زیر سطوح سنگی، سنگریزه‌های درشت‌تر (شکل ۲) و رنگ متفاوت از افق رویین به‌عنوان انقطاع در نظر گرفته شد. بافت خاک در این خاکرخ از لوم رسی در افق‌های سطحی تا رس لومی شنی در افق‌های زیرین تغییر کرد. مقدار شن در افق زیرین، بیشترین مقدار (۵۵ درصد) را داشت. تغییرات نامنظم مقدار کربن آلی در این خاکرخ نشان‌دهنده تغییر در رسوبگذاری مواد آبرفتی است. مقدار کربنات کلسیم معادل نیز از ۳۰-۱۸ درصد متغیر بود. pH خاک‌ها کمتر از ۸/۵ و EC آن‌ها حداکثر ۰/۴۳ دسی‌زیمنس بر متر بود.

خاکرخ شماره ۲، در بخش میانی مخروطافکنه قرار گرفته است. بخش اول این خاکرخ دارای افق‌های Vk (صفر تا ۲ سانتی‌متر) و Bt (۲-۱۲ سانتی‌متر) است. افق Bt قرمز رنگ (7.5YR5/4)، با ساختمان بلوکی و بافت لوم رسی، دارای پوسته رسی که مقادیر رس و عمق آن نشان‌دهنده افق مشخصه آرجیلیک است. بخش دوم این خاکرخ، افق 2BCk1 و 2BCk2 می‌باشد که رنگ خاک آن‌ها از افق رویین متمایز است و دارای ۸۰ درصد قطعات سنگی که نمایانگر رسوبگذاری متفاوتی است که به‌عنوان انقطاع سنگی شناسایی گردید. در این افق، پندانت های آهکی در زیر سطوح سنگی که در شکل ۴ ج مشاهده می‌گردد و نشانگر افق مشخصه کلسیک خاک است. بخش سوم این خاکرخ دارای افق 3Ck است که دارای رنگ روشن‌تری نسبت به افق‌های رویین است. این افق بدون ساختمان، دارای پندانت آهکی در زیر سطوح سنگی است. بافت خاک این خاکرخ لوم رسی می‌باشد. EC خاک حداکثر ۰/۴۱ دسی‌زیمنس بر متر، pH در امتداد خاکرخ از ۸/۱۶ در سطح به ۹/۱۴ در لایه‌های زیرین می‌رسد و مقدار کربنات کلسیم معادل ۲۹/۷۵-۱۹ درصد متغیر بود.

خاکرخ شماره ۳، در قاعده مخروطافکنه قرار دارد که چهار دوره رسوبگذاری و به تبع آن چهار انقطاع سنگی تشخیص داده شد. بخش اول، دارای افق‌های AVk و Bt با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. افق AVk به‌دلیل داشتن ۰/۸ درصد کربن آلی و کمی تیره رنگ بودن در افق اصلی A قرار گرفته و به‌دلیل ساختمان وزیکولار و وجود پوسته های زیستی خاک به‌عنوان افق اصلی V نیز شناسایی شد. این افق کربنات بیوژنیک (شکل ۴ ب) در بخش ریشه‌ها تشکیل شده است ولی به‌دلیل نبود سایر شرایط افق کلسیک، به‌عنوان افق ژنتیکی در نظر گرفته شد. افق Bt این خاکرخ مشابه افق Bt در خاکرخ شماره ۲ می باشد و دارای ساختمان بلوکی متوسط است. بخش دوم دارای افق 2BCk (۲۵-۹۰ سانتی‌متر) به رنگ 10YR6/3 متمایز از رنگ افق رویین و دارای ۷۸ درصد قطعات سنگی، مشابه افق 2BCk خاکرخ شماره ۲، و دارای پندانت آهکی و شرایط افق کلسیک است. افق 3Bk دارای رنگ قهوه‌ای متمایل به زرد، بافت شنی‌تر و قطعات سنگی در اندازه کوچک‌تر از افق رویین، و به علت داشتن شرایط خاک‌سازی و کربنات پدوژنیک به‌عنوان افق B در نظر گرفته شد. بخش آخر این خاکرخ، از یک افق 4Bt، قرمز رنگ (7.5YR5/4)، دارای ساختمان بلوکی، پوسته رسی و بافت لومی، تشکیل شده است. همچنین، مقدار قطعات سنگی به‌طور محسوسی (۱۰ درصد) کمتر از افق رویین بود. بافت خاک در افق‌های کلسیک، لوم رسی شنی و در سایر لایه‌ها، لومی بود. مقدار کربنات کلسیم معادل در این خاکرخ ۲۸/۶-۱۶/۲ درصد متغیر بود. pH خاک‌ها بین ۸/۷۴ -۷/۶۴ و EC آن‌ها حداکثر ۰/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر بود.

1- Desert varnish



شکل ۳- الف) سنگ‌های دارای جلای بیابان در سطح خاک (پیشوند Yermic در طبقه‌بندی جهانی)، ب) کلسیم کربنات بیوژنیک در افق سطحی خاک، ج) تشکیل پندات آهکی در زیر سنگریزه‌ها در افق‌های BCk، Bk و Ck، د) نودول و تجمع آهک در افق Btk خاکرخ شماره ۱

Figure 3- a) Desert varnish rocks on the soil surface (prefix Yermic in the WRB), b) biogenic calcium carbonate in the surface soil horizon, c) formation of carbonates under the pebbles in the BCk, Bk, and Ck horizons, d) nodule and carbonates accumulation in the Btk horizon of profile

تغییرات کربن آلی و تنفس میکروبی خاک

با توجه به شکل ۴ الف، مقدار رطوبت در سطح خاک مخروطافکنه از بالا به سمت قاعده، به علت شیب، کمی افزایش یافته و نفوذ آب در هرسه خاکرخ در دومین لایه افزایش داشته است. روند رطوبت به افق های انتهایی در خاکرخ شماره ۱ افزیشی بوده است. رطوبت موجود در خاکرخ شماره ۲ در افق 2BCk2 کاهش را نشان داد، زیرا مقدار شن این لایه بیشتر بوده و ماده مادری در لایه زیرین تغییر کرده است. رطوبت در افق‌های 2BCk و 3Bk خاکرخ شماره ۳ نیز کاهش داشته است، زیرا بافت خاک این دو افق درشت‌تر از افق‌های رویین و زیرین است و افق 3Bk کاهش بیشتری را نشان داد زیرا دارای بافت شنی تری بود. مطابق با شکل ۴ ب، میزان کربن آلی در سطح مخروط افکنه از بالادست به سمت پایین‌دست افزایش یافته است در حالی‌که به طورکلی در طول خاکرخ‌ها کاهش یافته است. بررسی تنفس میکروبی در سطح خاک شکل اراضی نشان داد که خاکرخ‌های شماره ۱ و ۳ دارای میزان مشابهی تنفس میکروبی هستند و مقدار کمتری نسبت به خاکرخ شماره ۲ دارند (شکل ۴ ج). روند تنفس میکروبی در طول هر سه خاکرخ نشان داد که در افق حاوی آرجیلیک، تنفس کاهش داشته است و در افق‌های کلسیکی به جزء افق 2BCK خاکرخ شماره ۳ افزایش یافته است.

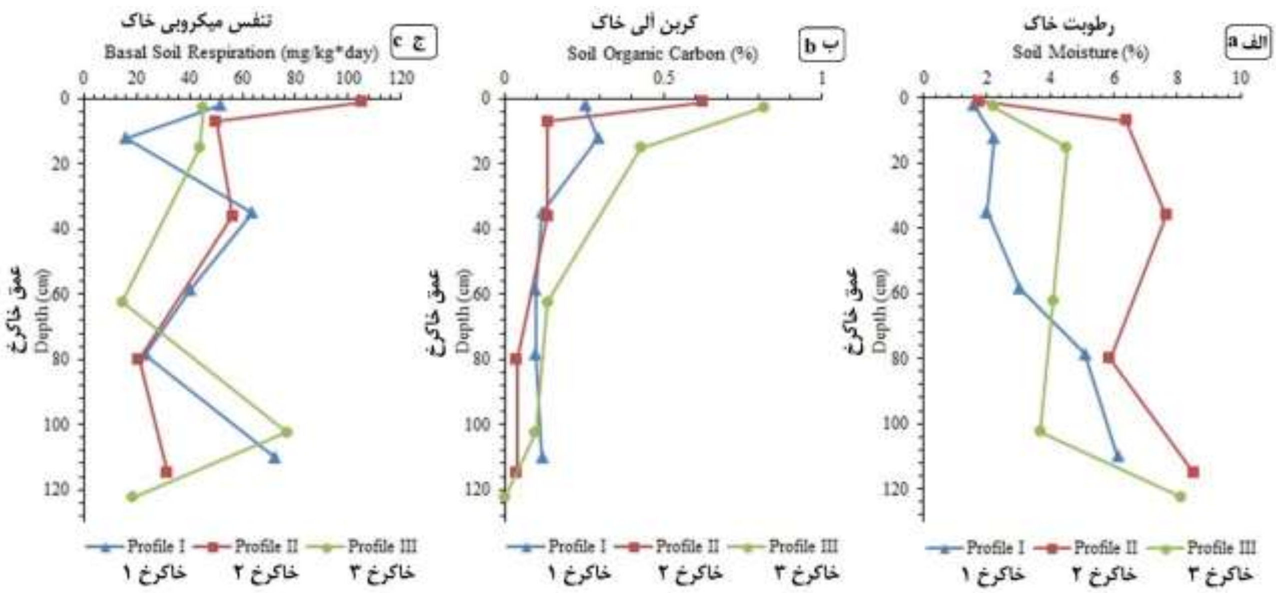
روابط فیزیکی و شیمیایی خاک با افق‌ها

به‌منظور بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با افق‌های مختلف خاک از آنالیز مؤلفه اصلی (PCA[1]) با استفاده از نرم افزارJMP PRO 16 بهره گرفته شد. نتایج PCA سه فاکتور اصلی را ارائه کرد که دارای مقادیر ویژه بیشتر از یک بودند و ۸۱ درصد از تغییرپذیری را توضیح دادند. مطابق با شکل ۵ فاکتور اول ۴۰/۵ درصد از کل تنوع را تخمین زد که بیشترین ارتباط مثبت را به ترتیب با کربنات کلسیم معادل، pH و قطعات سنگی، و بیشترین ارتباط منفی را با سیلت و کربن آلی داشت. فاکتور دوم ۲۵/۷ درصد از تغییرات را بیان کرد و بیشترین ارتباط را با مقادیر شن، گچ و رس ایجاد کرد. تنفس میکروبی خاک کمترین ارتباط را با محور فاکتورهای PCA داشت.

فاکتور اول، نمودار رج‌بندی PCA (شکل ۵) افق‌های خاک را از نظر ویژگی‌های فیزیکوشمیایی مشابه در دو دسته طبقه‌بندی کرد. افق های دارای مشخصه کربنات ثانویه در قسمت مثبت محور فاکتور اول واقع شدند که شامل: افق‌های 3Btkb و 4BCkb خاکرخ شماره ۱، افق های 2BCk و 3Ck خاکرخ شماره ۲، افق‌های 2BCk و 3Bk خاکرخ شماره ۳ و افق $2Bw_2$ از خاکرخ شماره ۱ با کمترین تشابه در ویژگی

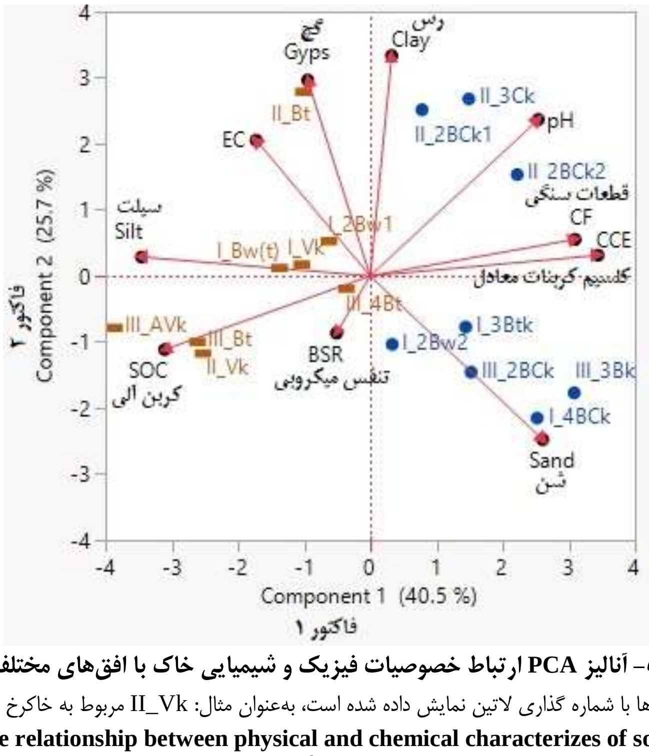
1- Principal components analysis

های این دسته قرار گرفت. در قسمت منفی فاکتور اول افق‌های سطحی اکریک و افق‌های دارای مشخصه آرجیلیک واقع شدند. افق‌های سطحی دارای مقادیر کربن آلی بیشتری نسبت به افق‌های زیرین هستند. افق‌های آرجیلیک همراه با مقادیر گچ بیشتری نسبت به افق رویین خود بودند زیرا گچ همراه با رس آبشویی و انتقال یافته است.



شکل ٤- بررسی روند تغییرات مقادیر رطوبت وزنی (الف)، کربن آلی (ب) و تنفس میکروبی (ج) در خاکرخ‌ها

Figure 4- Examining the changes in moisture (a), organic carbon (b) and microbial respiration (c) values in the profiles



شکل ۵- آنالیز PCA ارتباط خصوصیات فیزیک و شیمیایی خاک با افق‌های مختلف خاک

(شماره خاکرخ‌ها با شماره گذاری لاتین نمایش داده شده است، به‌عنوان مثال: II_Vk مربوط به خاکرخ شماره ۲ است)

Figure 5- PCA analysis of the relationship between physical and chemical characterizes of soil and different soil horizons

(BSR: microbial respiration, SOC: organic carbon, CF: coarse fragments, CCE: calcium carbonate equivalent; profile numbers are displayed with Latin numbering, for example: II_Vk corresponds to profile number 2)

ویژگی‌های میکرومورفولوژی

بررسی مقاطع نازک افق‌های خاک مورد مطالعه نشان داد که افق ها دارای کربنات ثانویه، پوسته‌های رسی و هوادیدگی آهن هستند.

از آنجا که اقلیم کنونی منطقه نیمه‌خشک می‌باشد، رسوبات بادرفتی به مقدار کم در سطح خاک قابل مشاهده است و باعث ایجاد ساختمان وزیکولار گردید (شکل ۶ الف). پوسته زیستی خزه در سطح خاکرخ‌های ۲ و ۳ مشاهده شد (شکل ۶ ب). شکل ۶ ج در مرز افق‌های AVk و Bt نودول اورتیک کربنات که به‌صورت در جا شکل گرفته و تشکیل اگزالات کلسیم در ریشه قابل مشاهده است. تشکیل نودول کربنات به صورت آزاد در فضای خالی و تجمع کلسیت سفید رنگ به‌صورت نودول در افق Vk و AVk در شکل ۶ د مشاهده شد. پوسته‌های رسی در اطراف حفرات و قطعات در افق Bt خاکرخ‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده انتقال رس در نتیجه نفوذ آب از افق بالاتر است (شکل ۶ ه).

در افق کمبیک (2Bw) خاکرخ شماره ۱ نودول تیپیک آهن که دارای ذرات در ابعاد شن، دارای مرز واضحی با ماتریکس خاک است و نودول‌های ریز آهن به‌صورت پراکنده در این خاکرخ قابل رؤیت است. همچنین این افق دارای پوسته رسی بر روی دانه کوارتز می‌باشد که نمایانگر خاک‌سازی در این افق است ولی مقدار آن‌ها به حد کافی برای افق مشخصه نمی‌باشد (شکل ۶ و).

در افق‌های BCk، کربنات‌ها به‌صورت نودول‌های تیپیک مشاهده شدند. مرفولوژی این نودول‌ها از نوع ماتریکس پدوفیچر[1] بوده که از اشباع زمینه با کربنات ایجاد شده است (شکل ۶ ط)؛ اشباع شدن در حد متوسط بوده و اجزاء در اندازه سیلت به وضوح در نودول کربنات‌ها دیده می‌شود، همچنین نودول‌های آهن ماتریکس را اشباع کرده است. نودول‌های شکل گرفته به‌دلیل اینکه پس از تشکیل در زمینه جابه‌جایی نداشته‌اند از نوع اورتیک نودول می‌باشند (Stoops, 2003).

افق Btkb خاکرخ شماره ۱ علاوه بر کربنات ثانویه، قرمز شدن رنگ خاک در مقیاس ماکرومورفولوژی از دیگر پدیده خاک‌سازی این افق است. نودول‌های کربنات به‌صورت تیپیک[2] هستند و ترکیبی از رس و سیلت از اجزاء زمینه در نودول‌ها قابل مشاهده بود. همچنین پوسته‌های رسی نازک در اطراف نودول‌های کربنات و حفرات این افق شکل گرفته‌اند، همچنین نودول‌های اکسید آهن در ماتریکس[3] مشاهده شد (شکل ۶ ی). وجود پوسته‌های رسی بر روی نودول‌های کربنات شاهدی بر رخداد یک دوره اقلیمی مرطوب بر اقلیم خشک بوده است؛ ابتدا تجمع کربنات‌ها در طی اقلیم خشک صورت گرفته و سپس در طی دوره مرطوب رس‌ها در اثر نفوذ آب از افق فوقانی در گذشته به این افق انتقال یافته و به‌صورت پوسته رسی اطراف نودول‌ها قرار گرفته است. نودول‌های آهن به‌دلیل آزاد شدن آهن و رسوب به‌صورت اکسیدهای آهن همزمان با تشکیل افق آرجیلیک که شرایط هوادیدگی فراهم بوده، تشکیل شده‌اند.

در افق 4Bt خاکرخ شماره ۳ ماتریکس متراکم و اشباع از پوسته‌های رسی به‌صورت پراکنده و تغییر شکل یافته[4] به همراه نودول‌های آهن که در یک دوره مرطوب انتقال یافته و هوادیده شده‌اند (شکل ۶ ک). میکرومورفولوژی پوسته‌های رسی در افق 4Bt در خاکرخ شماره ۳ نشان‌دهنده تشکیل آن در یک دوره مرطوب است که احتمالاً پس از آن یک دوره خشک‌تر حاکم شده که افق 3Bk گواه این موضوع است و کربنات ثانویه در این افق تشکیل شده و در نتیجه پوسته‌های رسی در افق زیرین (4Bt) در زمینه پراکنده شده‌اند.

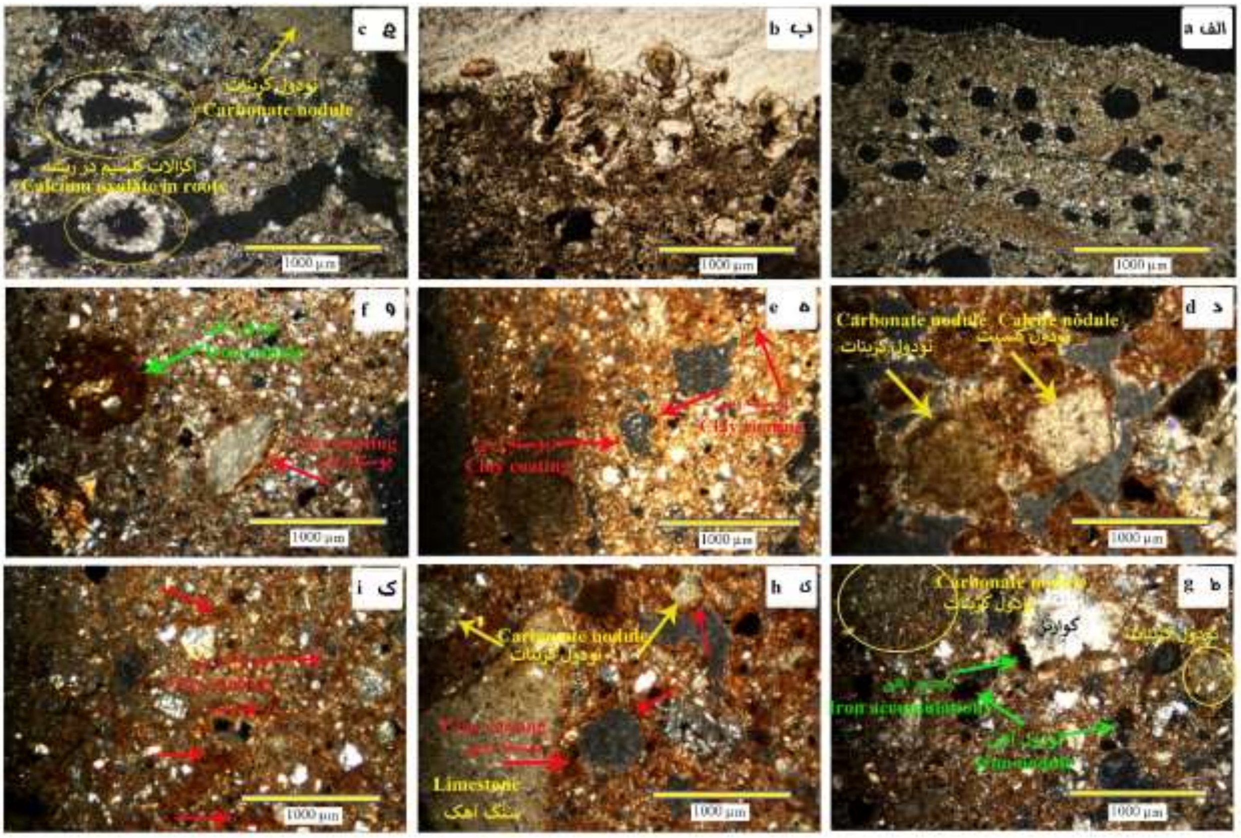
طبقه‌بندی خاک

در جدول ۳ خاکرخ‌ها براساس دو سامانه رده‌بندی آمریکایی (Soil Survey Staff, 2022) و جهانی (IUSS Working Group WRB, 2022) طبقه‌بندی شده‌اند.

با توجه به افق‌های مشخصه آرجیلیک و کلسیک در خاکرخ‌ها و رژیم رطوبتی اریدیک در مرز زریک منطقه طبقه‌بندی خاک بر اساس سامانه آمریکایی، افق کمبیک رویین در خاکرخ شماره ۱ دارای عمق مناسب برای مدفون در نظر گرفتن افق‌های زیرین را داشت و در طبقه‌بندی آمریکایی Xeric Haplocambids قرار گرفت و خاکرخ-های ۲ و ۳ مخروطافکنه در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفتند. طبقه‌بندی به سامانه جهانی نیز تفاوت میان بخش بالای مخروطافکنه با بخش‌های میانی و قاعده را نشان داد (جدول ۳).

نکته قابل توجه در قابلیت سامانه جهانی برای طبقه‌بندی خاک‌های مدفون است. خاکرخ شماره ۱، خاک مدفون شده دارای افق کلسیک در سامانه جهانی مشخص شده است در صورتی‌که به این ویژگی در نامگذاری به روش آمریکایی اشاره نشده است. سامانه طبقه‌بندی جهانی وجود انقطاع سنگی در خاکرخ را با پسوند Raptic و حضور پوسته زیستی را با پسوند Biocrustic بیان کرده است؛ همچنین رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای تشکیل‌دهنده مخروطافکنه با پسوند Fluvic و Solimovic بیان شدند، که از مزایای استفاده از این سامانه است.

1- Matrix pedofeature
2- Typic nodule
3- Matrix
4- Deformed



شکل ٦- بررسی میکرومورفولوژی خاک افق‌ها؛ بجزء تصویر ب که در حالت PPL است، تمامی تصاویر در حالت XPL می‌باشند. الف) ساختمان وزیکولار در افق Vk و AVk، ب) پوسته زیستی خزه بر روی سطح خاکرخ‌های شماره ۲ و ۳، ج) تشکیل اگزالات کلسیم در ریشه و نودول کربنات در افق Vk و AVk، د) تشکیل نودول کربنات و کلسیت در افق Vk خاکرخ شماره ۱، ه) ماتریکس آهن‌دار و تشکیل پوسته رسی در اطراف حفره در افق Bt خاکرخ شماره ۲، ط) زمینه پورفیریک، اورتیک نودول کربنات، نودول‌های اکسید آهن در ماتریکس در افق BCk، و) زمینه متراکم و پورفریک، تشکیل پوسته رسی بر روی دانه کوارتز و تشکیل نودول اکسید آهن در افق 2Bw خاکرخ شماره ۱، ی) نودول کربنات، اشباع زمینه از اکسیدهای آهن و رس، پوشش سنگ آهک میکریتی و نودول‌ها توسط پوسته رسی نازک در افق Btkb خاکرخ شماره ۱، ک) زمینه متراکم و اشباع از پوسته رسی در افق Bt خاکرخ شماره ۳.

Figure 6- a) vesicular structure in the Vk and AVk horizons, b) moss biological crust on the surface of the profiles, c) formation of calcium oxalate in the roots and carbonate nodules in the Vk and AVk horizons, d) formation of carbonate and calcite nodules in the Vk horizon of profile 1, e) iron oxide matrix and formation of clay coating around the void in the Bt horizon of profile 2, f) porphyric background, orthic carbonate nodule, iron oxide nodules in the matrix in the BCk horizon, g) dense and porphyric background, clay coating formation on the quartz grain and iron oxide nodule formation in the 2Bw horizon of profile 1, h) carbonate nodule, saturation of the background with iron oxide and clay coating, micritic limestone cover and nodules by a thin clay coating in the Btkb horizon, profile 1, i) dense background and saturation of clay coating in the horizon Bt profile 3

بحث

تغییر و تحول خاک

در خاک‌های مورد بررسی توالی رسوبگذاری و افق‌های مختلف کمبیک، کلسیک و حداکثر تکامل آرجیلیک مشاهده شد که نشان‌دهنده دوره‌های رسوبگذاری و خاک‌سازی که بسته به تغییر اقلیم و شدت آن تشکیل شده‌اند. وجود لایه‌هایی با مقادیر و اندازه متفاوت قطعات سنگی و افق‌های مشخصه، نمایانگر تناوب رسوبگذاری آبرفتی و تغییر و تحول خاک‌ها در دوره‌های مختلف است؛ همچنین افق سطحی خاک شکل اراضی، وزیکولار و ورقه‌ای بود که در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمول است (McFadden , 2013; Dietze *et al.*, 2016).

جدول ۳- طبقه‌بندی خاکرخ‌های منطقه مورد مطالعه
Table 3- Classification of soils of the studied area

شماره خاکرخ Profile	موقعیت ژئومورفیک Geomorphic location	سامانه طبقه‌بندی آمریکایی Classification of Soil Taxonomy	سامانه طبقه‌بندی جهانی Classification of World Reference Base
I	بخش بالایی مخروطافکنه، ساختار قدیمی رسوبات The apex of the alluvial fan, Old structure of sediments	Xeric Haplocambids	Fulvic Yermic Calcaric Cambisols (Loamic Aeolic Biocrustic Ochric Raptic) over Luvic Calcisols (Loamic Fluvic Ochric Raptic Solimovic)
II	بخش میانی مخروطافکنه، ساختار میانه رسوبات The middle of the alluvial fan, Middle structure of sediments	Xeric Calciargids	Abruptic Calcic Yermic Luvisols (Loamic Fulvic Ochric Raptic Solimovic)
III	بخش قاعده مخروطافکنه، ساختار جدید رسوبات The base of the alluvial fan, New structure of sediments	Xeric Calciargids	Abruptic Calcic Yermic Luvisols (Loamic Fulvic Ochric Raptic Solimovic)

مدل جانسون و واتسون–استگنر (Johnson and Watson-Stegner, 1987) تغییر و تحول خاک مخروطافکنه را به خوبی توضیح می‌دهد، زیرا خاک را تحت تأثیر فزاینده‌های پیشرونده و پسرونده می داند که به سوی تکامل و یا در خلاف آن حرکت می‌کند و این روندها با افق‌های مخروطافکنه هماهنگی دارد.

افق‌های وزیکولار توسط رسوبات بادرفتی در زمان کنونی تشکیل شده‌اند که اقلیم منطقه نیمه‌خشک می‌باشد، در حالی‌که منطقه از رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای شکل گرفته است. یافته‌های ضیائی و همکاران (Ziyaee *et al.*, 2018) نشان داد که برداشت رسوبات بادرفتی در استان خراسان رضوی به علت کمبود پوشش گیاهی سطح، سرعت باد و کمبود بارندگی رخ داده و در مناطق دیگر مانند مناطق کوهستانی و مخروطافکنه مورد مطالعه فرونشست آنها رخ داده است که مقدار آن ۷۵ گرم در متر مربع در سال است. این گرد و غبار توسط باران از روی ذرات درشت ششته و به زیر آنها منتقل شده و باعث تشکیل افق وزیکولار شده است. سطح خاک توسط پوسته‌های زیستی که در اقلیم اریدیک در مرز زریک منطقه زندگی می‌کنند، آن‌ها نقش حیاتی در خواص و فرآیندهای مختلف خاک، به دام انداختن رسوبات، به‌ویژه ساختار منافذ سطحی خاک و فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با منافذ خاک، مانند نفوذ و تبخیر، ایفا می‌کنند (Sun *et al.*, 2023). آن‌ها به همراه پوشش گیاهی باعث حرکت آب در خاک می‌گردند، و با افزایش تنفس و تولید دی‌اکسیدکربن باعث تشکیل کربنات پدوژنیک و بیوژنیک در افق وزیکولار می‌شوند و هم حرکت آب باعث انتقال رس و تشکیل پوسته‌های رسی در زیر این افق‌ها شده‌اند (شکل ۶ ج). مطالعات قبلی بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2013) و رشیدی و همکاران (Rashidi *et al.*, 2022) نشان داده است که منطقه مشهد و اطراف آن، دارای یک خاک با تکامل کم با افق Bk یا Bw است که در دوره‌های مرطوب هولوسن تشکیل شده و افق‌های متکامل Bt و Btk در دوره‌های گرم و مرطوب آخرین چرخه یخچالی–بین یخچالی در پلئیستوسن انتهایی تشکیل شده‌اند. با توجه به شرایط فعلی منطقه به‌نظر می‌رسد که خاک رویین در هولوسن تشکیل شده است. با این حال پوسته‌های زیستی و رژیم رطوبتی اریدیک در مرز زریک منطقه توانسته شرایط تشکیل کربنالت پدوژنیک و انتقال رس را باعث شود. نتایج مک فادن (McFadden, 2013) حاکی از آن بود که خاک‌هایی در زیر سنگفرش‌های بیابانی رشد می‌کنند که به‌طور فزاینده‌ای از گرد و غبار به دام افتاده تشکیل شده‌اند که متعاقباً به زیر منتقل می‌گردند؛ افق‌های وزیکولار، افق سطحی کلیدی خاک‌های رویین بیابانی، و افق‌های B غنی‌شده با کربنات کلسیم و رس ضخیم‌کننده، عمدتاً از طریق توسعه بر افزایشی و تورمی شکل می‌گیرند، که نوعی توسعه خاک تجمعی مرتبط با بالا آمدن خاک رویین بیابانی است. درحالی‌که افق Bw خاکرخ شماره ۱ بطوری‌که در جایگاه عمقی مقابل دو خاکرخ دیگر به‌دلیل اینکه دارای پوشش گیاهی و پوسته‌های زیستی خیلی کمتر در بخش بالایی مخروطافکنه واقع شده است؛ زیرا در این بخش ناپایداری و فرسایش بیشتر از بخش‌های میانی و قاعده است. پژوهش بشتیان و همکاران (Bashtian *et al.*, 2019) نشان داد که بخش بالایی این مخروطافکنه دارای پوشش زیستی کمتری نسبت به سایر بخش‌ها است. در نتیجه این افق کمبیک که دارای تحول کمتری نسبت به افق متقابل در دو خاکرخ دیگر، در این خاکرخ شکل گرفته است.

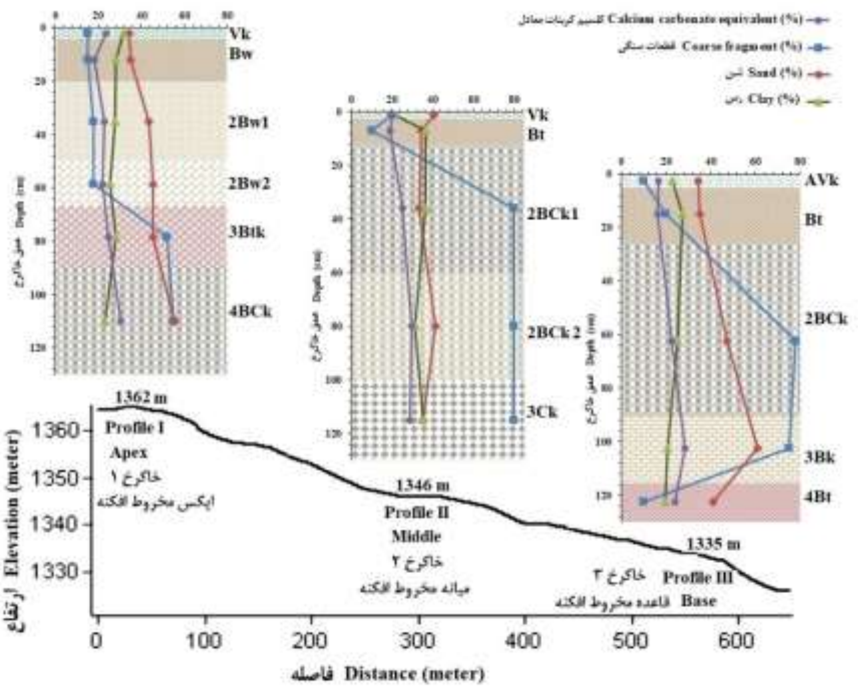
با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که مخروافکنه دارای شکل

محدب می‌باشد و خاکرخ شماره ۲ در بخش تحدب قرار گرفته است؛ در نتیجه افق BCk در آن دارای ۸۰ درصد قطعات سنگی آبرفتی با ضخامت بیشتری از خاکرخ شماره ۳ است. در این افق نودول‌های آهکی را به‌صورت پندانت مشاهده کردیم، بنابراین یک روند تغییر و تحول براساس نتایج بدست آمده و مطالعات قبلی که در ایران انجام شده است، وجود دارد؛ رشیدی و همکاران (Rashidi *et al*., 2022) و کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2011) چند دوره خاک‌سازی را در شمال شرق ایران شناسایی کرده‌اند. خاک‌سازی با شدت کم در مشهد و حتی در کلات نادری، باعث تشکیل افق کلسیک شده است، مطالعات نشان داده است که یک دوره مرطوب در هولوسن موجب تشکیل کربنات‌های پدوژنیک در آن زمان شده است (Tanner *et al*., 2010; Karimi *et al*., 2011).

افق‌های دسته کربنات ثانویه نیاز به اقلیم خشک‌تری نسبت به افق های آرجیلیک که نیاز به اقلیم گرم و مرطوب دارند (شکل ۵). افق 3Btkb خاکرخ شماره ۱، نشان‌دهنده تغییر اقلیم است؛ کربنات‌ها قبل از انتقال رس تجمع یافته‌اند و توالی پوشش کربنات و رس در این افق نشان‌دهنده پلی‌ژنتیک بودن خاک است، زیر این دو فرآیند مجزا بوده و همزمان رخ نمی‌دهند (Gunal and Randsom, 2006; Ufnar, 2007; Bockheim and Hartemink, 2013). انتقال رس پس از انتقال کربنات کلسیم صورت می‌گیرد زیرا حضور یون‌های Ca^{2+} باعث هم‌آوری و منعقد شدن رس می‌شود. تشکیل افق آرجیلیک در افق 4Bt خاکرخ شماره ۳ و 3Btkb خاکرخ شماره ۱ احتمالا مربوط به اقلیم گرم و مرطوب در دوره بین یخچالی پلئیستوسن شکل گرفته‌اند. وجود افق آرجیلیک در آب و هوای نیمه‌خشک نشان‌دهنده یک فرآیند قدیمی در شرایط ژئومورفولوژیکی پایدار بوده است (Khormali *et al*., 2003). در حالی که افق آرجیلیک (Bt) در خاکرخ‌های شماره ۲ و ۳ که در عمق کمتری تشکیل شده‌اند مربوط به همین دوره هولوسن می‌باشند؛ که بنظر می‌رسد میکرواقلیم به انتقال رس کمک کرده و یک افق ارجیلیک تشکیل شود.

تغییرات تنفس میکروبی در لایه‌های مختلف خاک

فرآیندهای هوادیگی طولانی مدت در بالادست مخروطافکنه در سطح خاک، باعث شکل‌گیری بافت رسی لومی شده است. در این موقعیت شکل اراضی به علت فرآیندهای فرسایشی، لایه‌های سطحی غنی از کربن آلی به پایین‌دست انتقال یافته است و در نتیجه معدنی شدن کربن آلی را در پی داشته است. در مقابل قاعده مخروطافکنه محیطی پایدارتر و دارای بافتی لومی است، کربن آلی افزایش یافته و نسبت معدنی شدن کربن آلی کاهش یافته است.



شکل ۷- نمای شماتیک روند تغییرات مقادیر کلسیم کربنات معادل، قطعات سنگی، شن و رس در عمق خاکرخ‌ها و توالی افق‌ها در امتداد گرادیان مخروطافکنه

Figure 7- Schematic representation of the changes in the amounts of calcium carbonate equivalent, coarse fragments, sand, and clay in the depth of the soil and the sequence of horizons along the gradient of the alluvial fan

در بخش میانی سطح خاک لومی می‌باشد و میزان تنفس میکروبی افزایش داشته است، زیرا حساسیت‌پذیری کربن آلی نسبت به تنفس کاهش یافته است. تنفس خاک بالا را می‌توان به علت تجزیه تسریع شده مواد آلی در نتیجه افزایش کیفیت بستر نسبت داد (He *et al.*, 2018). این مطالعه نشان داد که لایه‌های دارای افق آرجیلیک دارای میزان تنفس کمتری نسبت به افق رویین می‌باشند. به‌نظر می‌رسد افق آرجیلیک به‌عنوان یک محدودکننده انتشار برای دی‌اکسید کربن بالا در اینجا عمل می‌کند (Schulz *et al.*, 2011). در حالی‌که افق‌های کلسیک دارای تنفس بالاتری بوده‌اند، زیرا ممکن است در این افق‌ها کربنات کلسیم با مواد آلی کمپلکس ایجاد کرده و باعث حفظ کربن شوند. یافته‌های سودن و همکاران (Sugden *et al.*, 2004) و ترومبور و همکاران (Trumbore *et al.*, 2006) نشان داد که دی‌اکسید کربن عمیق از منابع متعدد حاصل می‌شود. منابع احتمالی دی اکسید کربن عمیق عبارتند از: تنفس ریشه و قارچ، تجزیه مواد آلی تابیده شده توسط فعالیت میکروبی، رسوب کلسیتی (حتی اعماق خاک). یافته‌های کشیرسکایا و همکاران (Kashirskaya *et al.*, 2018) نشان داد که تعداد و زیست‌توده سلول‌های میکروبی در خاک‌های مدفون شده در دوره‌های رطوبت زیاد اتسفری حداکثر بوده است. بنابراین در افق آرجیلیک، هوادیدگی شدید و اجزای کربن باقی مانده مقاوم به تجزیه هستند که ممکن است اندازه‌گیری کربن آلی آن را نشان ندهد، مانند افق 4Bt که مقدار کربن آلی صفر است. تنفس میکروبی همبستگی مثبتی با کربن بیومس میکروبی و اجزای سبک کربن آلی دارد، زیرا آنها نقش منبع و ابزار برای تنفس میکروبی را بازی می‌کنند (Liu *et al.*, 2021).

نتیجه‌گیری

خاک مخروطافکنه براساس طبقه‌بندی آمریکایی در بخش بالایی Xeric Haplocambids و در بخش‌های میانه و قاعده در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفت. طبقه‌بندی جهانی نیز خاکرخ بالایی را در گروه مرجع Cambisols over Calcisols قرار داد و دو خاکرخ میانه و قاعده شکل اراضی در گروه مرجع Luvisols قرار گرفتند. در این منطقه پوسته‌های زیستی و پوشش گیاهی بر تشکیل خاک در رسوبات بادرفتی افق Vk و AVk تأثیر گذاشتند و در ایجاد افق زیرین Bt در خاکرخ‌های شماره ۲ و ۳ نقش بسزایی داشتند. خاکرخ‌های مخروطافکنه، تجمع کربنات‌های ثانویه را نشان داد که یک فرآیند مهم در افق‌های خاک‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد در حالی‌که پوسته رسی در افق‌های تحتانی خاکرخ‌ها نشان‌دهنده اقلیم گرم و مرطوب در گذشته این منطقه است، اما افق آرجیلیک در لایه‌های رویین در همین دوره کنونی هولوسن تشکیل شده‌اند. این شکل از افق آرجیلیک نسبت به خاک‌های منطقه ایران کمی متمایز است، زیرا تا کنون این افق‌ها گزارش نشده‌اند. ثابت شده است که در هولوسن، دوره های مرطوب‌تری وجود داشته و نیاز به مطالعات بیشتری در حال حاضر دارد.

بررسی تنفس میکروبی در افق‌های مختلف خاک نشان داد که در افق‌های آرجیلیک ممکن است به‌دلیل نبود کربن قابل دسترس میزان تنفس میکروبی کاهش یافته باشد، در حالی‌که افق‌های کلسیکی به دلیل کربن حفظ شده دارای تنفس میکروبی بالاتری هستند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی مقادیر اجزای کربن در ارتباط با بیومس میکروبی در افق‌ها و خاک‌های قدیمی بررسی گردد.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پژوهش‌های رساله دکتری (طرح پژوهشی ۳/۵۲۴۱۷) و تحت حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

منابع

1. Allison, L. E., & Moodie, C. D. (1965). Carbonate. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, *9*, 1379-1396. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c40
2. Anderson, J.P.E. (1982). *Soil respiration*. InA. L. Page (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. http://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed
3. Bashtian, M.H., Sepehr, A., Farzam, M., & Bahreini, M. (2019). Biological soil crusts, plant functional groups, and soil parameters in arid areas of Iran. *Polish Journal of Ecology*, *66*(4), 337-351. https://doi.org/10.3161/15052249PJE2018.66.4.003
4. Bayat, O., Karimzadeh, H., Eghbal, M., & Khademi, H. (2013). Pedogeomorphic evolution of an alluvial fan in central Iran. *Journal of Range and Watershed Managment*, *66*(2), 191-206. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.35572
5. Bockheim, J.G., & Hartemink, A.E. (2013). Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma*, *209*, 153-160. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.009
6. Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). *Handbook for soil thin section description*.

Waine Research.
7. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., & McDaniel, P.A. (2011). *Soil genesis and classification*. John Wiley & Sons. https://www.wiley.com/en-us/Soil Genesis and Classification
8. Dietze, M., Dietze, E., Lomax, J., Fuchs, M., Kleber, A., & Wells, S.G. (2016). Environmental history recorded in aeolian deposits under stone pavements, Mojave Desert, USA. *Quaternary Research*, *85*(1), 4-16. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.11.007
9. Dowlatabadi, S., Amirabadizadeh, M., & Zarei, M. (2022). Evaluation of WetSpass-M model for estimation of hydrological response of Neyshabur-Rookh watershed to climate change of future years. *Water and Soil*. (In Persian). https://doi.org/10.22067/JSW.2022.78598.1199
10. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, *5*, 383-411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
11. Ghaemi, F. (1994). Geological map of Neyshabur, 1:100000 scale, Ministry of Mines and Metals, Geological Organization of Iran.
12. Ghasemzadeh Ganjehie, M., Karimi, A.R., Zeinadini, A., & Khorasani, R. (2017). Investigationof clay mineralogy, micromorphology and evolution of soils in Bajestan Playa. *Water and Soil*, *30*(6), 2046-2059. (In Persian). https://doi.org/10.22067/JSW.V30I6.51463
13. Gunal, H., & Ransom, M.D. (2006). Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. *Catena*, *68*(1), 59-69. https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.027
14. He, Z.B., Chen, L.F., Du, J., Zhu, X., Lin, P.F., Li, J., & Xiang, Y.Z. (2018). Responses of soil organic carbon, soil respiration, and associated soil properties to long-term thinning in a semiarid spruce plantation in northwestern China. *Land Degradation & Development*, *29*(12), 4387-4396. https://doi.org/10.1002/ldr.3196
15. IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4 edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. https://www.iuss.org/publications/iuss-alerts-2021-2022/iuss-alert-205-july-2022/
16. Jenny, H. (1981). The Soil Resource-Origin and Behavior. Ecological Studies 37. *Soil Science*, *132*(5), 380. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1981/11000/The_Soil_Resource_Origin_and_Behavior__Ecological.10.aspx
17. Johnson, D.L., & Watson-Stegner, D. (1987). Evolution model of pedogenesis. *Soil Science*, *143*(5), 349-366. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1987/05000/EVOLUTION_MODEL_OF_PEDOGENESIS.5.aspx
18. Karimi, A., Frechen, M., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2011). Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran. *Quaternary International*, *234*(1-2), 124-132. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.08.002
19. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., & Stoops, G. (2003). Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*, *53*(3), 273-301. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00040-7
20. Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., ... & Zeng, N. (2015). Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, *7*(1), 47-85. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015
21. Liu, T., Peng, D., Tan, Z., Guo, J., & Zhang, Y. (2021). Effects of stand density on soil respiration and soil labile organic carbon and their influence mechanism in Larix Principis-Rupprechtii plantations. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-143559/v1
22. McFadden, L.D. (2013). Strongly dust-influenced soils and what they tell us about landscape dynamics in vegetated aridlands of the southwestern United States. https://doi.org/10.1130/2013.2500(15)
23. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, *5*, 961-1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34
24. Omran, E.S.E. (2016). A simple model for rapid gypsum determination in arid soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, *2*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s40808-016-0242-3
25. Ponti, D.J. (1985). The quaternary alluvial sequence of the Antelope Valley, California. *Geological Society of America Special Paper*, *203*, 79-96. https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/books/book/339/chapterpdf/965614/spe203-0079.pdf
26. Rashidi, Z., Karimi, A., Murray, A., Khormali, F., Farpoor, M.H., & Sohbati, R. (2022). Late Pleistocene–Holocene pedogenesis and palaeoclimate in western Asia from palaeosols of the Central Iranian Plateau. *Boreas*, *51*(1), 201-218. https://doi.org/10.1111/bor.12541
27. Schaetzl, R.J., & Thompson, M.L. (2015). *Soils*. Cambridge university press. https://www.cambridge.org/ir/universitypress/subjects/earth-and-environmental-science/soil-science/soils-genesis-and-geomorphology-2nd-edition
28. Schulz, M., Stonestrom, D., Von Kiparski, G., Lawrence, C., Masiello, C., White, A., & Fitzpatrick, J. (2011). Seasonal dynamics of CO_2 profiles across a soil chronosequence, Santa Cruz, California. *Applied Geochemistry*, *26*, S132-S134. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.048
29. Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., & Benham, E.C. (Eds.). (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Government Printing Office.

30. Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy
31. Stock, J.D., Schmidt, K.M., & Miller, D.M. (2008). Controls on alluvial fan long-profiles. *Geological Society of America Bulletin*, *120*(5-6), 619-640. https://doi.org/10.1130/B26208.1
32. Stoops G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and Regolith thin sections. Soil Science Society of America. Inc. *Madison, Wisconsin*. 184p.
33. Stoops, G. (2018). Micromorphology as a tool in soil and regolith studies. In Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths (pp. 1-19). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00001-2
34. Sugden, A., Stone, R., & Ash, C. (2004). Ecology in the underworld. *Science*, *304*(5677), 1613-1613. https://doi.org/10.1126/science.304.5677.1613
35. Sun, F., Xiao, B., Li, S., Yu, X., Kidron, G.J., & Heitman, J. (2023). Direct evidence and mechanism for biocrusts-induced improvements in pore structure of dryland soil and the hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 129846. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129846
36. Tanner, L.H. (2010). Continental carbonates as indicators of paleoclimate. *Developments in Sedimentology*, *62*, 179-214. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)06204-9
37. Trumbore, S., Da Costa, E.S., Nepstad, D.C., Barbosa De Camargo, P., Martinelli, L. A., Ray, D., ... & Silver, W. (2006). Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration. *Global Change Biology*, *12*(2), 217-229. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001063.x
38. Ufnar, D. F. (2007). Clay coatings from a modern soil chronosequence: a tool for estimating the relative age of well-drained paleosols. *Geoderma*, *141*(3-4), 181-200. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.017
39. Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, A. J., Barger, N.N., Chaudhary, V.B., ... & Bowker, M.A. (2022). What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, *97*(5), 1768-1785. https://doi.org/10.1111/brv.12862
40. Weldmichael, T.G., Michéli, E., Fodor, H., & Simon, B. (2020). The influence of depth on soil chemical properties and microbial respiration in the upper soil horizons. *Eurasian Soil Science*, *53*(6), 780-786. https://doi.org/10.1134/S1064229320060137
41. Williams, A.J., Buck, B.J., & Beyene, M.A. (2012). Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, *76*(5), 1685-1695. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0021
42. Wood, B.D., Keller, C.K., & Johnstone, D.L. (1993). In situ measurement of microbial activity and controls on microbial CO_2 production in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, *29*(3), 647-659. https://doi.org/10.1029/92WR02315
43. Xiao, B., Bowker, M.A., Zhao, Y., Chamizo, S., & Issa, O.M. (2022). Biocrusts: Engineers and architects of surface soil properties, functions, and processes in dryland ecosystems. *Geoderma*, *424*, 116015. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116015
44. Ziyaee, A., Karimi, A., Lakzian, A., & Khademi, H. (2018). Dust deposition rate and its relationship to some climatic parameters in Khorasan Razavi province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *7*(2), 95-114. (In Persian). https://doi.org/10.22067/GEO.V7I2.66306